

文章编号: 0258-7025(2003)11-0969-04

# 双光栅外腔可调谐掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器

李乙钢<sup>1</sup>, 侯国付<sup>1</sup>, 吕可诚<sup>1</sup>, 陈胜平<sup>1</sup>, 宁 鼎<sup>2</sup>, 盛秋琴<sup>1</sup>, 董孝义<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>南开大学<sup>1</sup> 物理科学学院, <sup>2</sup> 现代光学研究所, 天津 300071)

**摘要** 采用一种新颖的双光栅装置作为外腔调谐结构, 实现了掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器的调谐输出, 调谐范围 1037~1106 nm。双光栅结构的应用, 使调谐输出的激光光谱的线宽大大变窄, 小于 0.1 nm。检偏器测量结果表明, 整个调谐范围内的激光输出均为线偏振光。

**关键词** 光电子学; 掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤; 双光栅结构; 可调谐

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## Tunable Yb<sup>3+</sup>-doped Double-cladding Fiber Laser with a Double-grating Configuration

LI Yi-gang<sup>1</sup>, HOU Guo-fu<sup>1</sup>, LÜ Ke-cheng<sup>1</sup>,

CHEN Sheng-ping<sup>1</sup>, NING Ding<sup>2</sup>, SHENG Qiu-qin<sup>1</sup>, DONG Xiao-yi<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Physics, <sup>2</sup>Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract** Using a novel double-grating arrangement, a tunable Yb<sup>3+</sup>-doped double-cladding fiber laser with a tuning range from 1037 nm to 1106 nm has been demonstrated. Because of the double-grating arrangement, the bandwidth of every tuned laser is greatly narrowed to less than 0.1 nm, and the output laser is linearly polarized light.

**Key words** optoelectronics; Yb<sup>3+</sup>-doped double-cladding fiber; double-grating arrangement; tunable

## 1 引 言

掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤是继掺 Er<sup>3+</sup> 光纤后出现的又一种优秀光纤<sup>[1]</sup>。掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤具有镱离子能级比较简单、不存在对抽运光或信号光的激发态吸收、不存在浓度淬灭效应等优点, 因而可以有更高的效率; 而其较宽的吸收光谱(800~1060 nm)可以有多种抽运源; 较宽的增益谱(975~1200 nm)可以很方便地实现大范围的调谐输出<sup>[2~5]</sup>。结构紧凑、高功率、可调谐、激光二极管(LD)抽运的掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器可以取代固体激光器作为光纤放大器或光纤拉曼激光器的抽运源, 在光纤通信领域以及医学、商业打标、工业加工等领域有着广泛的应用, 近年来得到人们的普遍关注<sup>[1~7]</sup>。

本文报道了一种结构新颖的可调谐掺 Yb<sup>3+</sup> 双

包层光纤激光器。利用尾纤输出的 LD 抽运掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤, 采用双光栅作为外腔调谐装置, 在 1037~1106 nm 范围内实现了近 70 nm 的调谐激光输出。整个调谐范围内输出激光光谱的线宽均小于 0.1 nm, 均为线偏光。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示。抽运源是 TY1402 型尾纤输出的半导体激光器。中心波长 976 nm, 最大输出功率 5 W。

双包层光纤的圆形内包层直径为 125 μm, 相应的数值孔径为 0.36; 单模纤芯直径为 5 μm, 相应的数值孔径为 0.16; 纤芯 Yb<sup>3+</sup> 离子的掺杂浓度为 760 × 10<sup>-6</sup>。光纤长度为 24 m, 可以保证抽运光能够得

收稿日期: 2002-04-29; 收到修改稿日期: 2002-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 60137010)重点资助项目。

作者简介: 李乙钢(1962—), 男, 南开大学物理科学学院副教授, 博士, 主要从事光电子学、激光技术和非线性光学的研究。

E-mail: liyigang@nankai.edu.cn

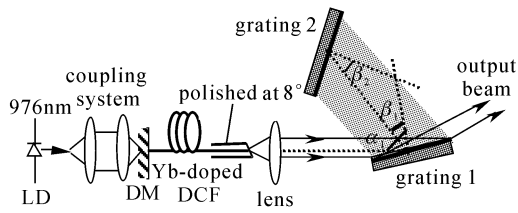


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

到充分的吸收。

为了使前向和后向的光功率以相同的方向传输从而增加输出功率,以及防止后向输出光对 LD 的损害,将一个二相介质镜(DM)放在双包层光纤的入射端。二色镜对 976 nm 的抽运光透射率为 85%,对 1010~1200 nm 波段的信号光反射率为 99.9%。双包层光纤的入射端面做垂直切割和抛光处理,并紧贴于二色镜上。为了抑制由于光纤端面的菲涅耳后向反射而可能在光纤内形成的激光振荡,并同时提高外腔的耦合效率,扩大调谐范围,将光纤的另一端面磨成 8°斜角。激光器谐振腔由置于光纤入射端面的二色镜和双光栅外腔构成。两闪耀光栅具有相同的参数 1200 lines/mm,闪耀波长均为 1060 nm。

激光器的输出功率由 LP-3A 型功率计测得,测量范围为 2 mW~2 W,分辨率为 0.01 mW;输出波长由 Ms9001B1 型光谱仪测量,测量范围为 600~1800 nm,最小波长分辨率为 0.1 nm。

### 3 双光栅结构线宽压窄作用的理论分析

外腔调谐的激光器一般包括两种结构:Littman 结构和 Littrow 结构。双光栅装置作为 Littman 结构的一种扩展形式,实际上包含了 Littman 和 Littrow 两种结构的思想<sup>[8~10]</sup>,如图 1 所示。其中的一个光栅(Grating 1)放置在掠入射状态(Grating 1 也称为 Littman 光栅),同时作为光束扩展器和光输出耦合器,光栅的零级衍射光作为输出,一级衍射光入射到第二个光栅(Grating 2)上;第二个光栅按 Littrow 角度放置(Grating 2 也称为 Littrow 光栅),也就是使入射到第二个光栅上的光的一级衍射按原路返回激光器的腔中,形成激光振荡。双光栅装置由于使用了两个光栅,大大增加了对信号光的色散,输出的激光线宽将被极大地压窄。分析如下:

双光栅装置中,无源线宽可表示为<sup>[10]</sup>

$$\delta\nu_{\text{dg}} = \frac{2c}{\pi\omega\lambda \left( \frac{2m_1}{d_1 \cos\beta_1} + \frac{m_2}{d_2 \cos\beta_2} \right) \cos\alpha_1} \quad (1)$$

其中  $c$  为光速, $\omega$  为光束半径, $d_1$  和  $d_2$  分别为 Littman 光栅和 Littrow 光栅的光栅常数, $m_1$  和  $m_2$  分别为两光栅相应的衍射级次, $\alpha_1$  为光束入射角, $\beta_1$  为 Littman 光栅的衍射角, $\beta_2$  为 Littrow 光栅的 Littrow 角度, $\lambda$  为激光波长,角标 dg 表示双光栅。

对于 Littman 结构,由于 Littrow 光栅换成了平面镜,衍射级次  $m_2 = 0$ ,上述线宽可以简化为

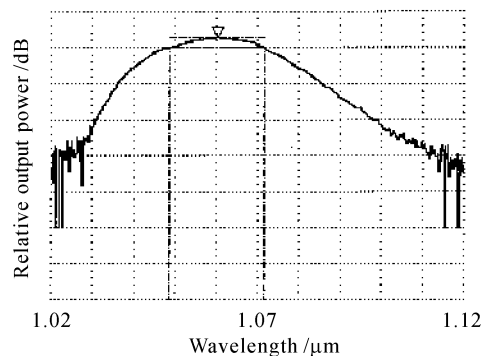
$$\delta\nu_{\text{sg}} = \frac{cd_1}{\pi m_1 \omega \lambda} \cos\alpha_1 \quad (2)$$

其中角标 sg 表示单光栅,从(1)式和(2)式可以看出,双光栅装置的线宽比 Littman 装置的线宽减小了  $(1 + d_1 \cos\beta_1 / 2d_2 \cos\beta_2)$  倍。实验使用的两个光栅完全一样,即有  $d_1 = d_2, \beta_1 = \beta_2$ ,得  $\delta\nu_{\text{dg}} = 2/3 \cdot \delta\nu_{\text{sg}}$ 。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 激光器的调谐实验

实验中,如果没有构成外腔的闪耀光栅,器件将构成超荧光光纤光源<sup>[6]</sup>,其输出的是超荧光。当入射到光纤输入端的抽运功率为 673 mW 时,测得输出的荧光谱如图 2 所示。图中显示,掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤的增益谱范围为 1025~1115 nm,达 90 nm。

图 2 掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤的荧光谱Fig. 2 Fluorescence spectrum of the  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double cladding fiber

将掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤 8°斜角端输出的光经透镜准直后入射到双光栅外腔上,构成外腔可调谐激光器。利用闪耀光栅的衍射分光效应,通过调节 Littrow 光栅的角度,改变光栅的反馈波长,在 1037~1106 nm 范围内得到了调谐的激光输出。

由于闪耀光栅是偏振敏感元件<sup>[5]</sup>,因此,光纤内

的双折射效应将对激光器输出功率产生影响<sup>[2]</sup>。实验中采用了光纤环形偏振控制器,用于实现对光偏振态的控制,减少这种不良影响。

对于每一个激光波长,调节腔结构使之达到最佳,而后调节偏振控制器使输出功率达到最大,得到激光输出功率随相应波长的变化关系,如图 3 所示。

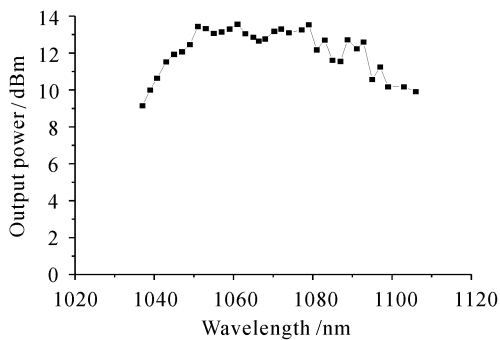


图 3 激光输出功率随波长的变化关系

Fig. 3 Output power versus wavelength of the tunable fiber laser

从图 3 可以看出,激光器输出功率随波长的变化关系与图 2 所示的荧光谱相比,两者虽然具有相同的整体性变化趋势,但是还不完全相符合。分析认为,造成这种差别的主要原因是实验中没有对光纤偏振控制器的环半径进行精确的设计<sup>[2]</sup>。偏振控制器虽然起了一定的作用,但并没有达到理想情况。若改进偏振控制器的环半径,将会使激光器输出功率随波长的分布曲线与荧光谱符合得更好。

#### 4.2 激光器的调谐输出特性

调节偏振控制器使激光输出功率达到最佳值,测得其中一个调谐波长( $\lambda = 1061$  nm)的激光功率特性曲线如图 4 所示。当入射到光纤的抽运功率为 699 mW 时,激光器输出功率达到最大值 24.5 mW,此时的输出光谱中心波长为 1061 nm,光谱仪显示线宽为 0.04 nm。实验中注意到,对于调谐范围内的每一个调谐波长,光谱仪显示的输出光谱的线宽均小于 0.1 nm。虽然这并不是输出光谱的精确线宽,但光谱仪的测量值表明激光器输出光谱的线宽比 Littrow 外腔调谐激光器的线宽要窄得多。

实验中,用一个对 1060 nm 波段的光半透半反的输出耦合镜代替双光栅作为激光器后腔镜,当入射到光纤的抽运功率为 699 mW 时,测得的激光输出波长为 1064.4 nm,对应的激光光谱线宽为 0.44 nm。在相同抽运功率下,激光器采用 Littrow 结构外腔时,测得激光输出波长 1075.4 nm 时的激光光

谱线宽仅为 0.14 nm,激光器输出线宽压窄了 3 倍<sup>[11]</sup>;当采用双光栅装置时,测得激光输出波长 1061 nm 时的激光光谱线宽近似为 0.04 nm,激光输出线宽压窄了~10 倍。

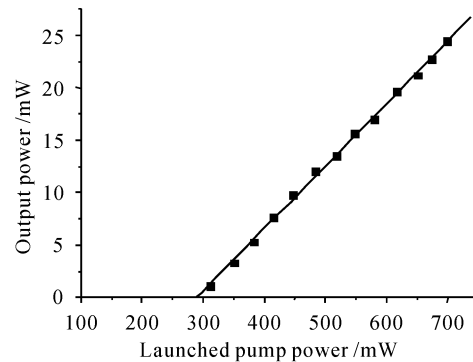


图 4  $\lambda = 1061$  nm 的激光输出功率特性曲线

Fig. 4 Output power characteristics of the tunable fiber laser at 1061 nm

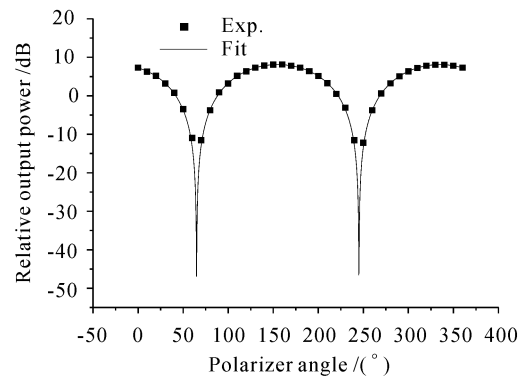


图 5 输出功率与偏振器偏振角的关系

Fig. 5 Power transmitted through the output polarizer as a function of polarizer angle

利用偏振器,可以测量激光器调谐输出激光的偏振特性。实验结果表明,在整个调谐范围内,激光器输出的均为线偏振光,偏振消光比均大于 18 dB。如  $\lambda = 1083$  nm 的激光,其偏振消光比为 20.3 dB,如图 5 所示。图中的点为实验测量值,实线是由公式  $P(\theta) = C_1 \sin^2 \theta + C_2$  拟合的结果,其中  $\theta$  为偏振器的偏振角, $C_1$  和  $C_2$  均为常数, $P(\theta)$  是透过偏振器的光功率<sup>[11,12]</sup>。

## 5 结 论

本文分析了结构新颖的双光栅外腔可调谐激光器的线宽压窄原理,对基于双光栅外腔结构的可调谐掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器进行了实验研究。闪耀

光栅作为调谐元件,通过调节光栅角度,在抽运功率为 673 mW 时,激光调谐输出范围为 1037~1106 nm。

双光栅的存在使激光线宽得到明显的压窄,在整个调谐范围内的线宽均小于 0.1 nm,而且是线偏振输出,偏振消光比大于 18 dB。

### 参 考 文 献

- 1 Lu Xiuquan, Chen Shaohe. Amplified spontaneous emission in ytterbium-doped monomode silica fiber [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **28**(2):125~129 (in Chinese)
- 2 D. C. Hanna, R. M. Percival, I. R. Perry *et al.*. An ytterbium-doped monomode fibre laser: broadly tunable operation from 1.010  $\mu\text{m}$  to 1.162  $\mu\text{m}$  and three-level operation at 974 nm [J]. *J. Modern Optics*, 1990, **37**(4):517~525
- 3 J. K. Sahu, C. C. Renaud, K. Furusawa *et al.*. Jacketed air-clad cladding pumped ytterbium-doped fiber laser with wide tuning range [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(18):1116~1117
- 4 Chen Bai, Chen Lanrong, Fan Wei *et al.*. Tunable operation in ytterbium-doped cladding fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1999, **28**(9):835~838 (in Chinese)
- 5 M. Auerbach, D. Wandt, C. Fallnich *et al.*. High-power tunable narrow line width ytterbium-doped double-clad fiber laser [J]. *Opt. Comm.*, 2001, **195**:437~441
- 6 Li Yigang, Liu Weiwei, Fu Chengpeng *et al.*. High-power Yb<sup>3+</sup>-doped double-cladding fiber broadband superfluorescent source [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(10):1171~1173 (in Chinese)
- 7 Ammar Hideur, Thierry Chartier, Cafer Ozkul *et al.*. All-fiber tunable ytterbium-doped double-clad fiber ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(14):1054~1056
- 8 Michael G. Littman. Single-mode operation of grazing-incidence pulsed dye laser [J]. *Opt. Lett.*, 1978, **3**(4):138~140
- 9 I. Shoshan, U. P. Oppenheim. The use of a diffraction grating as a beam expander in a dye laser cavity [J]. *Opt. Comm.*, 1978, **25**(3):375~378
- 10 D. Wandt, M. Laschek, A. Tünnermann *et al.*. Continuously tunable external-cavity diode laser with a double-grating arrangement [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(6):390~392
- 11 Hou Guofu, Li Yigang, Lü Kecheng *et al.*. Research on widely tunable Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2002, **31**(12):1510~1513 (in Chinese)
- 12 D. A. V. Kliner, J. P. Koplow, L. Goldberg *et al.*. Polarization-maintaining amplifier employing double-clad bow-tie fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(4):184~186